

EDISON_CFD : 유체공학 교육·연구용 e-Science 기반 시뮬레이션 소프트웨어 및 콘텐츠 개발

이근배[†]·이성욱^{*}·이창훈^{**}·최정일^{**}·이도형^{***}·김종암^{*}

EDISON_CFD : Development of e-Science-based Simulation Software and Contents for Education and Research in Fluid Engineering

Kuen-Bae Lee, Seonguk Lee, Changhoon Lee, Jung-il Choi, Dohyung Lee, Chongam Kim

Key Words: EDISON_CFD(에디슨_전산유체역학), e-Science(이사이언스), Fluid Engineering(유체공학), Software and Contents for Education and Research(교육·연구용 소프트웨어 및 콘텐츠)

Abstract

EDISON_CFD, an abbreviation of 'EDucation-research Integration through Simulation On the Net for Computational Fluid Dynamics', is a virtual organization designed to support the education research in fluid engineering on the e-Science environment. As the first step, our research group focuses on developing simulation software and contents based on numerical analyses. Through national research projects, many R&D results have been developed and accumulated in universities and research institutes. However, educational contents used for delivering advanced researches to inspire students still lack. Thus, development of software and contents for effective and advanced education & research is necessary. The present work aims to establish the platform of simulation softwares and contents for online education research in fluid engineering using the results of the state-of-art techniques. This will fortify not only the capability of students in fluid engineering but also the national strength in research.

1. 서 론

유체공학은 공학전반 시스템 설계, 공정 및 제작에 기저가 되는 원천기술 중의 하나이다. 특히, 국가 주요 성장 동력원이 되는 기계, 자동차, 항공, 중공업, 조선 등의 산업전반에서 요소부품 설

계 및 공정뿐만 아니라 최종 제품군에 이르기까지 많은 유체역학적 문제들에 대한 다각적인 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 그 원천기술의 활용도가 점차 확대되고 있다. 그에 대한 예로 유동해석기술은 자동차 항력저감, 연소혼합증대, 후류상관성을 고려한 풍력 블레이드 형상 설계 및 발전시설 최적화 등에 활용되어 왔다.

유체공학 연구는 경제적·산업적 측면에서 매우 중요한 분야이므로, 정부에서는 국가 과학기술경쟁력을 높이기 위해서 R&D 연구비를 최근 수년간 많이 증액했으며, 질적인 수준에서도 비약적으로 발전 하고 있다. 정부출연연구소 뿐만 아니라, 고등교육기관인 대학에서도 각종 연구사업을 통해 많은 연구 성과들이 축적되어 왔다. 유체공학 분야의 우수한 신기술 개발 및 연구 인

[†] 서울대학교 협동과정 계산과학전공
E-mail : kissing6482@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1903

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

^{**} 연세대학교 계산과학학과

^{***} 한양대학교 기계공학과

력양성은 정부의 연구사업 지원에 대한 긍정적인 결과라고 할 수 있다.

정부출연연구소 및 국내 대학들의 연구능력이 증대되었고, 규모와 첨단성 면에서 비약적인 발전이 이루어지고 있음에도 불구하고, 그 연구결과들이 교육현장에서 직접 활용되는 사례가 많지 않은 문제점이 있다. 따라서 우수한 연구결과를 고등교육 현장에 적시 활용할 수 있는 체계를 구축하여 활용함으로써 이공계 교육경쟁력을 강화해야 할 필요성이 다양하게 대두되고 있다.

본 연구에서는 수치해석기반의 유체역학 관련 교과과정에 대한 시뮬레이션 SW (software) 및 교육 콘텐츠를 개발 하고자 하며, 이는 실험 혹은 이론적 연구를 통해 얻을 수 있는 연구 결과물의 비용 및 그 제한적 응용성에 비해, 다양한 해석 대상에 대한 확장 및 응용이 가능한 장점을 갖는다. 이런 관점에서, 각광 받고 있는 IT 기술인 e-Science 기술⁽¹⁻³⁾의 장점을 극대화하여 유체공학 교육·연구를 위해 구현하고자 하는 가상 환경인 EDISON_CFD (EDucation-research Integration through Simulation On the Net for Computational Fluid Dynamics) 시스템을 소개하고, 온라인상에서 활용 가능한 심층 교육·연구용 SW 및 콘텐츠로 개발하고자 한다.

2. 유체공학 교육·연구용 SW 및 콘텐츠

2.1 비압축성 유동해석을 위한 범용 SW 및 교육용 콘텐츠 개발

EDISON_CFD 교육·연구 시스템과 같이 다양한 수준의 학생과 연구자가 접속하는 환경에서 다수의 문제를 다루어야 하는 유체공학 시뮬레이션을 위해서는 일정 범위의 범용 해석을 위한 SW가 필수적으로 개발 되어야 한다. 범용 SW의 개발은 유체공학의 수치해석에 관한 일정 수준의 이해와 노력을 바탕으로 대학(원)생들이 자신의 연구와 창의적 아이디어를 구현해 볼 수 있도록 하는 데 초점을 둔다.

본 시스템에서는 2차원의 다양한 형상에 대한 정렬격자 기반의 점성/비점성, 정상상태/비정상상태의 해석이 가능한 비압축성 유동해석 SW를 제공한다.

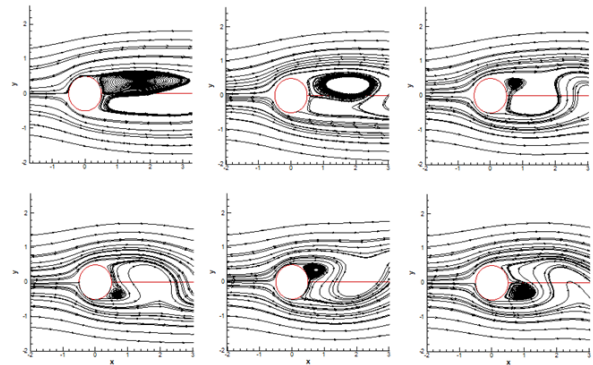


Fig. 1 Streamline over a circular cylinder, (Re = 140)

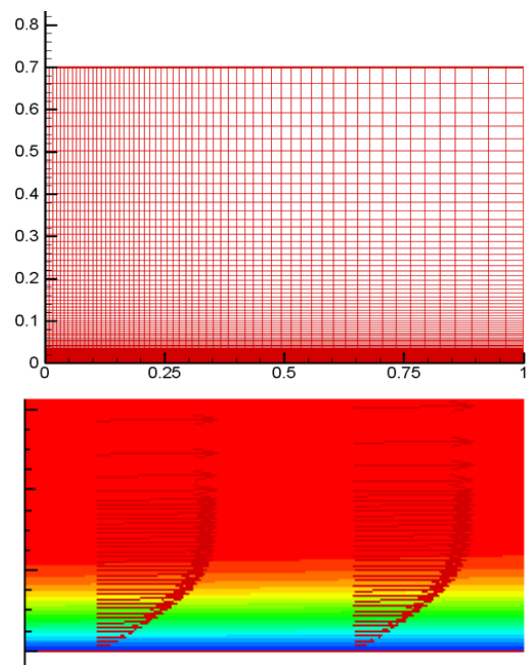


Fig. 2 Mesh(up) and velocity contour and vector(down) over a flat plate, (Re = 1.08×10^5)

현재 탑재된 SW의 주요 특징은 다음과 같다. 인공 압축성 (artificial compressibility) 기반의 다양한 수치기법을 적용하였으며, 공간차분은 풍상차분법에 2차 단조성 보존 내삽법을, 시간적분은 외재적 Euler 기법, 다단 Runge-Kutta 시간 적분법, 내재적 LU-SGS 방법 등을 사용하였다. 난류 유동장 해석을 위하여 Standard k-e, Wilcox's k-w, Menter's k-w SST 등의 옵션을 선택할 수 있도록 하였다. 적용된 수치기법의 자세한 내용은 참고문헌⁽⁴⁾에 기술되어 있다.

본 SW를 활용하여 유체공학 교육에 활용 가능

한 전형적인 예제로는 Fig. 1, 2와 같은 실린더 후류 유동해석 및 평판 유동해석 등을 들 수 있다. 또한, 본 연구에서는 유체공학 관련 수업에 적극 활용할 수 있도록 개발 SW와 연계된 교육용 콘텐츠를 개발한다. 교육용 콘텐츠는 대략 90분 강의용으로 구성되며, 해당 교과 이론에 관한 소개, 이론의 이해를 돕기 위한 개발 SW를 활용한 시뮬레이션 결과, 학생들이 직접 시뮬레이션을 할 수 있도록 구성된 스크립트와 매뉴얼로 구성된다.

비압축성 유동해석 SW를 활용한 교육용 콘텐츠의 한 예로, ‘타깃 공력계수 산출을 위한 비압축성 실린더 형상 설계’를 들 수 있다. 주요 내용은 Fig. 3과 같이 양력, 항력, 모멘트 계수 및 레이놀즈수 (Reynolds number), 스트로할수 (Strouhal number) 와 같은 무차원 파라미터들의 정의와 일반적인 특성을 설명하는 이론 학습 과정, 다양한 형태의 실린더 형상 및 격자를 제작하고 SW를 활용하여 시뮬레이션 할 수 있는 계산 실습 과정, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실린더 형상에 따른 유동특성을 고찰하고 설계된 실린더의 장단점을 비교·분석하는 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부 과정의 유체역학과 대학원 과정의 점성유체역학 및 전산유체역학 등에 활용할 수 있다.

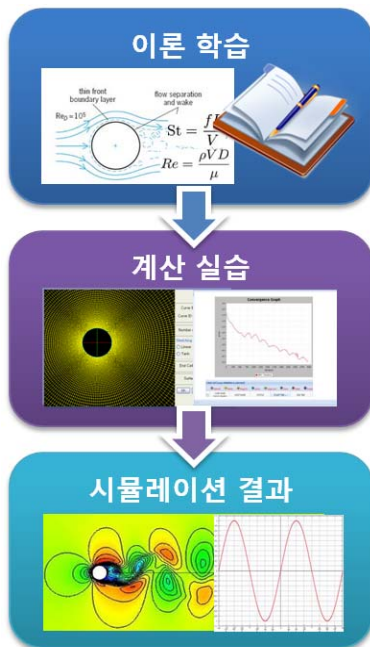


Fig. 3 Educational contents for simulation of a circular cylinder

2.2 난류·입자 유동해석 SW 및 교육용 콘텐츠

난류는 불규칙한 유동섭동 (random fluctuations)에 의해 순간속도의 시공간적 변화가 복잡하며, 그 특성을 파악하기 위해서는 다양한 통계적 기법이 요구된다. 본 시스템에서는 Navier-Stokes 방정식에 세밀한 격자계를 이용하여 난류에 존재하는 모든 유동의 스케일을 충분히 해석할 수 있는 직접수치모사 (Direct Numerical Simulation) 기법이 적용된 Pseudo-Spectral 기반 난류유동 해석 SW를 제공한다. 본 SW를 활용하여 유체공학 교육에 활용 가능한 전형적인 예제로 난류 채널유동 해석을 들 수 있다. Fig. 4는 완전 발달된 난류 채널유동에서 λ_2 방식을 통해 구한 벽면 근처 응집 난류구조와 주위의 주유동, 횡방향 와도를 나타내고 있으며⁽⁵⁾, 난류의 기본특성 및 유체입자가 속도의 간헐적 특성을 파악할 수 있다.

난류입자 유동에 대한 해석은 항공기, 터빈 등의 기계장치 설계에서부터 호흡을 통해 허파 내 입자점착에 따른 인체위해성 평가, 대기오염 및 방사능 누출, 테러에 따른 오염물질 확산 등에 이르기까지 기계, 항공 및 환경공학에 매우 중요한 연구 분야이다. 본 시스템에서는 다년간 축적된 높은 정확도의 난류유동 시뮬레이션개발 경험을 바탕으로 난류에 부유된 입자의 수치모사가 가능한 SW를 제공한다. 본 SW는 4-Point Hermite 보간법을 통해 계산된 입자 위치에서의 유동정보를 바탕으로, 매 순간 입자의 추적이 가능하다⁽⁶⁾.

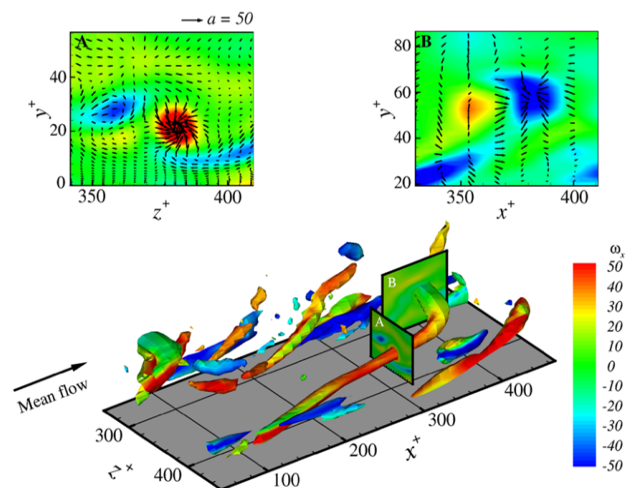


Fig. 4 Visualization of the near wall coherent vortical structures.

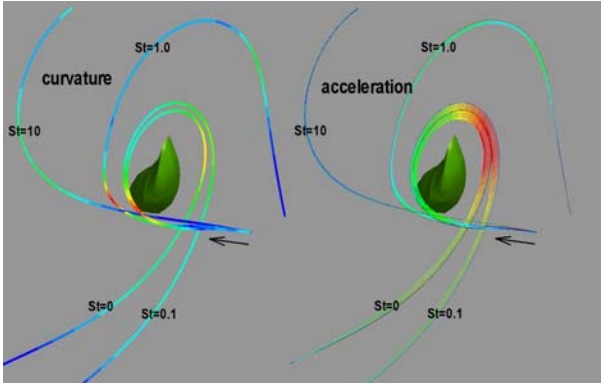


Fig. 5 Particle trajectories near a turbulent vortical structure. Colors indicate the level of curvature (left) and magnitude of particle acceleration (right).

입자의 Stokes 수가 1일 때, 즉 유동과 입자의 상호작용에 의해 와도가 상대적으로 작은 곳에서 군집 (clustering) 특성을 파악할 수 있다. Fig. 5는 입자궤적과 난류구조를 나타내고 있으며, 난류구조 근처에서 입자 궤적의 회전이 가속되는 것을 확인할 수 있으며, Stokes수가 커짐에 따라 입자에 미치는 영향은 줄어들고 그에 따라 곡률 및 가속도 또한 줄어듦을 확인할 수 있다.⁽⁷⁾

본 연구를 통해 유체공학 교육, 특히 난류유동 관련 수업에 적극 활용할 수 있도록 개발 SW와 연계된 교육용 콘텐츠를 개발한다. 난류입자 SW를 활용한 교육용 콘텐츠의 한 예로, ‘난류채널유동 내의 난류량 분석’을 들 수 있다. 난류의 구조 추출을 위한 기법 및 통계량 분석을 위한 스펙트럼 해석기법, 상관함수 기법 등을 설명하는 이론 학습 과정과 개발된 SW를 활용하여 난류 채널유동을 시뮬레이션하고 획득된 자료와 후처리 SW를 활용하여 난류의 기본성질을 다양하게 고찰하는 과정으로 구성된다. 또한 유동 내의 입자운동에 대해서는 입자추적기법에 대한 이론 학습 및 개발 SW를 활용하여 실제 난류 유동 내에서 입자를 추적함으로써 복잡한 난류현상과의 상호작용을 분석하는 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 학부과정의 유체역학, 응용유체역학과 대학원 과정의 점성유체역학, 난류 및 전산유체역학 등에 활용할 수 있다.

2.3 파이프 유동해석 SW 및 교육용 콘텐츠

파이프 내부의 비압축성 유동해석 SW는 직선

2차원 채널 및 3차원 파이프 유동, 그리고 3차원 파이프 내의 스윙 (swirl) 유동이 있으며, 각각의 문제에 대해 정상/비정상 상태의 해를 제공한다.

SW의 특징으로는 Navier-Stokes 방정식에 인공 압축성 (artificial compressibility) 을 도입하였으며, 비정상 유동 해석을 위해 이중 시간 전진 (dual time stepping) 방법이 적용되었다. 난류모델로는 Standard k-e, Wilcox’s k-w, Menter’s k-w SST 등의 옵션을 선택할 수 있도록 하였다. 격자의 형태로는 정렬 및 비정렬 격자가 사용되며, 파이프 형상에 따른 변수의 입력을 통해 격자가 자동으로 생성되도록 하였다.

EDISON_CFD 교육·연구 시스템에서 본 SW를 통해 학습하는 대학(원)생들은 Fig. 6과 같이 3차원 파이프 내에서의 압력구배 (pressure gradient), shear driven 유속 효과에 따른 속도분포와 전단력 및 완전 발달 유동 등에 대한 수치해석을 수행하고, 이론 해와의 비교를 통해 보다 효율적인 학습을 할 수 있을 것으로 기대한다.

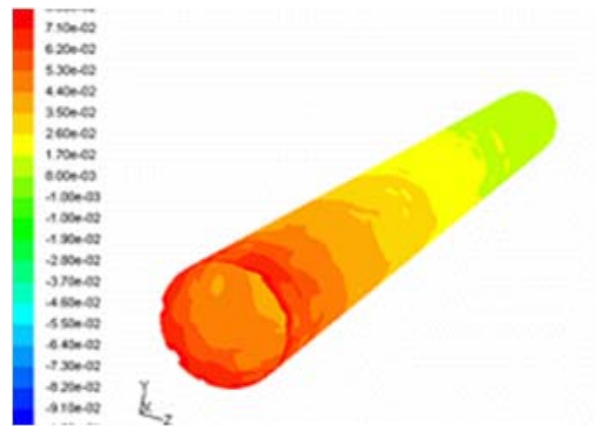


Fig. 6 3-Dimensional Pipe



Fig. 7 Pathline of flow pattern in a swirl pipe

파이프 유동의 응용된 내용인 3차원 파이프 내의 스윙 유동에서는 Fig. 7과 같이 원 관의 입구에서 축 방향으로 유입되는 축방향 유동 (U) 과 스윙 유동 ($U/\cos\theta$) 에 의해 발생하는 파이프 내부 벽면을 타고 흐르는 유동의 해석을 제공한다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 유체공학 관련 수업에 적극 활용할 수 있도록 개발 SW와 연계된 교육용 콘텐츠를 개발하고자 한다. 3차원 파이프 내에서의 비압축성 층류 유동 SW를 활용한 교육용 콘텐츠의 한 예로 ‘압력구배, shear driven 유속 효과에 따른 속도분포/전단력/완전발달 유동까지의 입구길이 분석’을 들 수 있다. 주요내용은 파이프 내의 스윙 유동에 대한 이론, 압력/shear driven 유동 이론 및 층류에서 난류가 되기까지 완전 발달 유동의 이론 학습 과정, 벽면 전단응력 및 파이프의 축 방향 위치별 압력구배 분석을 위해 파이프 형상 및 격자를 제작하고 해당 SW를 활용하여 시뮬레이션을 하는 계산 실습 과정, 시뮬레이션 결과를 통해 얻은 데이터의 분석과 이론적 비교 검증 과정으로 구성된다.

해당 콘텐츠의 대상 교과목은 유체역학과 전산 유체역학 등이 있으며, 학습 대상은 학부과정 학생 및 대학원생들이다.

3. 결론

본 연구에서는 유체공학 분야의 수치 시뮬레이션 연구 성과를 활용하고, e-Science 기술의 장점을 극대화하여, 온라인상에서 활용 가능한 유체공학 교과과정 관련 교육·연구용 SW 및 콘텐츠를 개발하는 것을 그 목표로 하였다. 특히, 기계공학과 관련된 유체공학 교육·연구용 SW 및 콘텐츠는 크게 비압축성 유동해석, 난류·입자 유동해석, 파이프 유동해석을 위한 SW 및 콘텐츠로 나누어 개발하였다.

본 EDISON_CFD의 SW 및 콘텐츠 개발을 통해, 유체공학 분야 대학(원)생의 최신기술 적응력을 제고하고, 향후 기술경쟁력을 높이는 우수한 연구 인력을 양성하며, 장기적으로 시뮬레이션 SW의 국산화에도 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 첨단사이언스 교육허브개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

(2011-0020559, 2011-0020561, 2011-0020562)

참고문헌

- (1) Kim, J-H, Yi, J., Ko, S-H, Ahn, J. W., Kim, C., Kim, Y., Cho, K. W., 2008, “e-AIRS: Construction of an Aerodynamic Integrated Research System on the e-Science Infrastructure,” *J. KSAS*, Vol. 36, No. 5, pp. 438-447.
- (2) Ko, S-H, Han, S., Kim, J-H, Moon, J. B., Kim, C., Cho, K. W., Kim, Y., 2009, “Integrated rocket simulation of internal and external flow dynamics on the e-Science environment,” *J. Korean Phy. Soc.*, Vol. 55, No. 5, pp. 2166-2171.
- (3) Kim, J-H, Kim, C., 2009, “Numerical investigation on the geometric factors of insects' wing motion using e-Science environment,” *J. Korean Phy. Soc.*, Vol. 55, No. 5, pp. 2172-2179.
- (4) Rogers, S. E., and Kwak, D., 1990, "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations," *AIAA J.*, Vol. 28, No. 2, pp. 253-262.
- (5) Lee, C., Yeo, K., Choi, J.-I., 2004, "Intermittent Nature of Acceleration in Near Wall Turbulence," *Phys. Rev. Let.*, Vol. 92, No. 14, 144502.
- (6) Choi, J.-I., Yeo, K., Lee, C., 2004, "Lagrangian Statistics in Turbulent Channel Flow," *Phys. Fluids*, Vol.16, No.3, pp.779-793.
- (7) Choi, Y., Park, Y., Lee, C., 2010, "Helicity and geometric nature of particle trajectories in homogeneous isotropic turbulence," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.31, No.3, pp.482-487.
- (8) Shin, T. S. and Lee, D., 2008, “Numerical simulation of Turbulent Dissipation and Pressure drop thorough a Vane Swirlers within pipe,” *J. KFMA*, pp. 591~596.